

УДК 535.016

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЛАГОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ**

**И.А. ГРАБАРЬ; канд. техн. наук, доц. Н.В. НАСОНОВА;  
канд. техн. наук, доц. Т.А. ПУЛКО; д-р техн. наук, проф. Л.М. ЛЫНЬКОВ**  
(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)

*Рассматриваются оптические характеристики композиционных влагосодержащих материалов. Демонстрируются полученные в ходе исследования коэффициент спектральной яркости и степень поляризации – оптические характеристики искусственных влагосодержащих материалов в диапазоне длин волн 440...940 нм. Представлен анализ зависимостей полученных результатов от размера частиц, цвета и структуры поверхности образцов. Обнаружена корреляция оптических характеристик исследованных материалов с природными фонами (снег, песок, водная гладь, растительность).*

**Ключевые слова:** композиционные влагосодержащие материалы, коэффициент спектральной яркости, степень поляризации, оптический контраст.

Все природные и искусственно созданные объекты при наблюдении в видимом диапазоне воспринимаются раздельно благодаря их яркостным различиям. Яркость объекта зависит от освещенности, отражательной способности, поглощения отражательного излучения промежуточной средой. К основным показателям, характеризующим яркость объектов, относится коэффициент спектральной яркости (КСЯ). Данная величина характеризует пространственное распределение спектральной яркости, отражающей поверхности, используется для объектов с тоновыми или цветовыми различиями.

Коэффициент спектральной яркости вычисляется по следующей формуле:

$$КСЯ = B/B_o, \quad (1)$$

где  $B$  – спектральная яркость объекта;  $B_o$  – спектральная яркость идеально рассеивающей поверхности в одинаковых условиях освещения и наблюдения.

Объекты могут быть выделены из фона в значительной степени благодаря различиям в их яркости, которые оцениваются яркостным (пограничным) контрастом  $K$ . Он равен отношению разности яркостей (коэффициентов яркостей) смежных объектов к большей из них:

$$K = (B_1 - B_2) / B_i. \quad (2)$$

Яркость, или цвет, объекта определяется характером отраженного лучистого потока и спектральной отражательной способностью, зависящей от структуры поверхности объекта. Существенно влияют на восприятие цвета характер освещения, его спектральный состав и мощность. При смене источника освещения может произойти изменение светлоты, насыщенности и тона цвета.

Исследования проводились в видимом диапазоне длин волн (400...1050 нм), в котором выделяют семь поддиапазонов: красный (770...650 нм); оранжевый (650...585 нм); желтый (585...575 нм); зеленый (575...510 нм); голубой (510...480 нм); синий (480...440 нм); фиолетовый (440...390 нм).

Оптическое излучение обладает высокой энергией. Энергия оптического излучения, падая на какой-либо объект, частично отражается от поверхности объекта, частично им поглощается и частично пропускается. Относительные значения потоков в долях от полного, упавшего на поверхность объекта, соответственно характеризуют коэффициенты отражения ( $r$ ), поглощения ( $a$ ) и пропускания ( $g$ ):

$$r + a + g = 1. \quad (3)$$

Эти коэффициенты служат важными оптическими показателями различных тел, определяющими их оптические свойства.

Шероховатость поверхности увеличивает эффекты многократного рассеяния оптического излучения, что приводит к уменьшению отражательных характеристик и увеличению коэффициента излучения. Увеличение содержания частиц меньших размеров на поверхности приводит к увеличению коэффициента спектральной яркости, обусловленному увеличением многократного внутреннего рассеяния света; уменьшение шероховатости поверхности обуславливает увеличение этого коэффициента. Структура поверхности объекта влияет на изменение яркости с изменением угла наблюдения.

Цель данной работы – получение искусственных влагосодержащих материалов, схожих по оптическим характеристикам с природными фонами; исследование и анализ их яркостных характеристик.

**Измерение оптических характеристик влагосодержащих композиционных материалов.** Изготовленные образцы представляли собой влагосодержащие композиционные материалы в виде прямоугольных пластин размером 60×70 мм, отличающиеся природой, размерностью и структурой элементов поверхности, а также их влагосодержанием (табл. 1).

**Таблица 1 – Описание исследуемых образцов**

Наименование образцов	Вид матрицы Материал и характерные размеры	Влагосодержание, %
Влагосодержащее трикотажное полотно (ТП)	Синтетическое волокнистое вязаное полотно, диаметр волокон около 25 мкм	60,0
Влагосодержащее целлюлозное нетканое полотно (ЦП)	Натуральное волокнистое нетканое полотно, диаметр волокон около 25 мкм	60,0
Гидрогель (г/г_1)	Гель на основе анионного полиакриламида и воды	76,0
Гидрогель (г/г_2)	Гель на основе анионного полиакриламида и воды	36,0
Смесь гидрогеля с силикагелем (с/г + г/г)	Полимерное соединение порошка силикагеля с гидрогелем	25,0
Силикагель в гранулах, (с/г)	Кремниевые пористые частицы сферической формы, размером 4 мм	15,0
Хна	Сферические частицы порошка растительного происхождения (размер фракций 0,1...0,5 мм) в клее	1,5
Лавровый лист (Лл_1)	Пластинчатые частицы фракциями растительного происхождения размером 1...3 мм в клее	1,5
Лавровый лист (Лл_2)	Пластинчатые частицы фракциями растительного происхождения размером 0,5...1,5 мм в клее	1,5

Исследования оптических характеристик проводились в видимом диапазоне (440...940 нм) с помощью гониометрической установки и спектрорадиометра ПСР-02, имеющего разрешение не хуже 2 нм с поляризационной насадкой, позволяющей регистрировать спектральную плотность энергетической яркости (СПЭЯ) образцов при различных положениях оси поляроида.

Спектрорадиометр ПСР-02 предназначен для проведения измерения в лабораторных и полевых условиях спектральной плотности энергетической яркости, а также поляризационных характеристик отраженного растительными элементами или другими объектами излучения в диапазоне длин волн от 0,35 до 2,5 мкм [2].

В результате обработки зарегистрированных на гониометрической установке спектров отражения в диапазоне 0,44...1,05 мкм были получены оптические характеристики исследуемых образцов при углах падения света 0, 45, 90° и углах наблюдения 0, 25, 45 и 65°.

Для обработки спектров отражения и вычисления КСЯ исследуемых объектов были получены спектры отражения для материала с равномерной индикатрисой рассеяния, в качестве которой использовался диффузный отражатель. В качестве отражателя использовалась пластина молочного стекла МС-20 толщиной 10 мм. Для анализа спектров отражения и вычисления КСЯ исследуемых материалов были получены спектры отражения для эталонного образца, выполненного на основе молочного стекла МС-20 с равномерной индикатрисой рассеяния при условиях измерений, аналогичных условиям для исследуемых образцов.

Коэффициент спектральной яркости КСЯ вычислялся как отношение СПЭЯ исследуемого материала к СПЭЯ молочного стекла МС-20. Величины СПЭЯ-спектров отражения образцов  $L_{об}$  нормировались на величину СПЭЯ-спектра, отраженного от МС-20 излучения  $L_{МС}$  для каждой длины волны, получая коэффициент спектральной яркости КСЯ исследуемых образцов  $R_{об}$ :

$$R_{об} = \frac{L_{об}}{L_{МС}}. \quad (4)$$

Степень поляризации рассчитывалась для каждой длины волны  $\lambda$  следующим образом:

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{L}, \quad (5)$$

где  $Q$ ,  $U$ ,  $L$  – параметры Стокса, определяемые по следующим формулам:

$$L = I_0 + I_{90}; \quad (6)$$

$$Q = I_{90} - I_0; \quad (7)$$

$$U = I_0 + I_{90} - 2I_{45}. \quad (8)$$

Спектральная зависимость степени поляризации  $P$  отраженного от объектов излучения корректировалась вычитанием известной поляризующей способности  $P_{PSR}$  спектрорадиометра ПСР-02 [3]:

$$P = P_{об} - P_{PSR} \quad (9)$$

Поляризующая способность ПСР-02 определялась с помощью диффузного излучателя – неполной фотометрической сферы, являющейся источником деполаризованного излучения в широком спектральном диапазоне вследствие многократных переотражений внутри сферы.

**Результаты и обсуждение.** На основе полученных экспериментальных и расчетных данных построены зависимости коэффициента спектральной яркости и степени поляризации от длины волны в видимом диапазоне длин волн для влагосодержащих композиционных материалов, изготовленных из волокнистых и порошкообразных материалов (рис. 1, а–е).

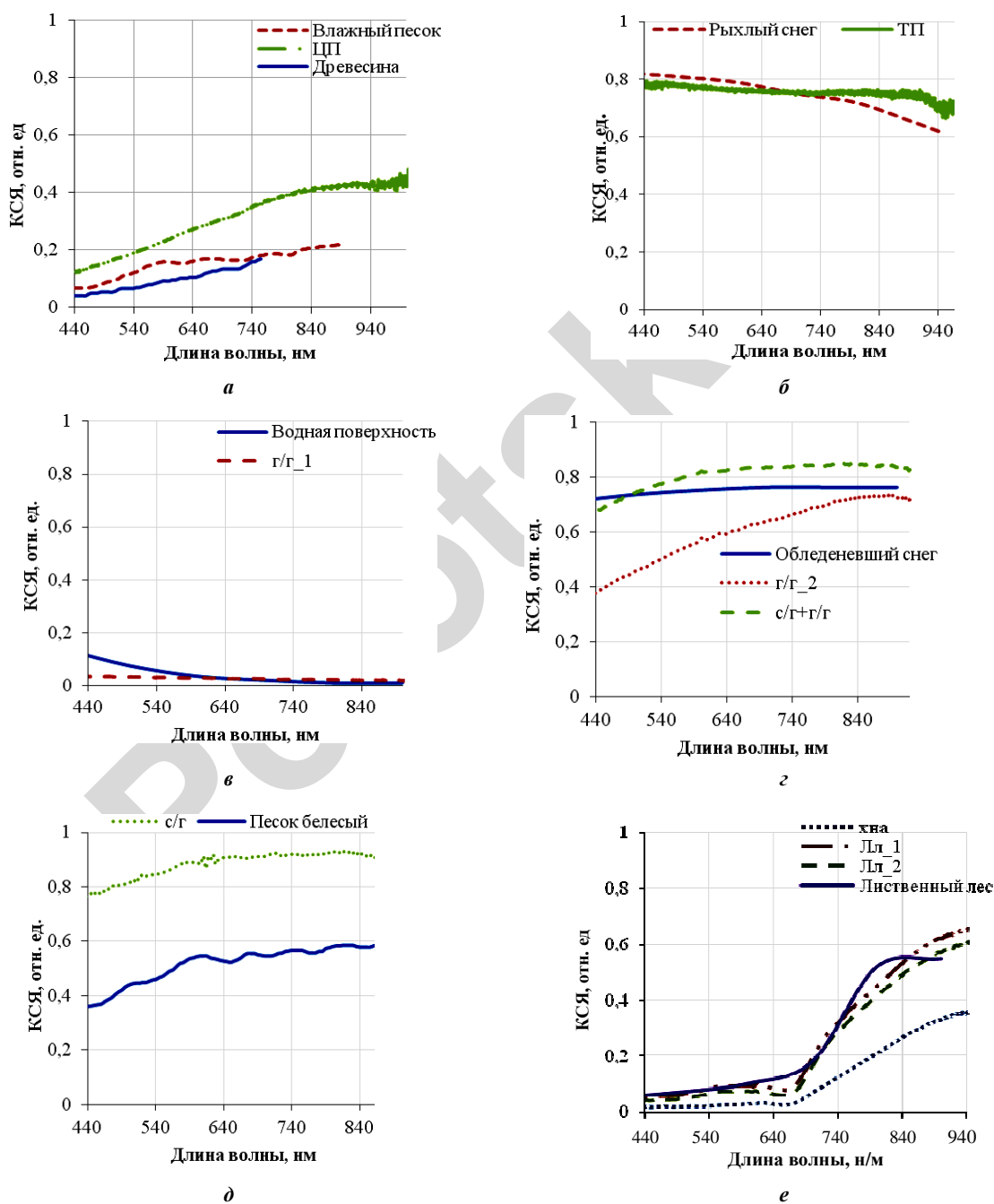


Рисунок 1 – Сравнительные характеристики коэффициента спектральной яркости от длины волны в видимом диапазоне при угле наблюдения  $0^\circ$

Анализ данных показал, что оптические характеристики полученных влагосодержащих образцов коррелируют с оптическими характеристиками природных фонов [5].

Влагосодержащее целлюлозное нетканое полотно по своим оптическим свойствам относится к селективно-поглощающим и рассеивающим средам благодаря своему физико-химическому составу и структуре поверхности. Характер и уровень *КСЯ* целлюлозного нетканого полотна схож с характеристикой желтого песка, контраст относительно песка составляет 0,2...0,49. Кроме того, сравнение характеристики влагосодержащего целлюлозного полотна с *КСЯ* древесины показало сходный характер зависимости, что может быть обусловлено высоким содержанием целлюлозы в древесине.

По структуре материала в видимом диапазоне влагосодержащее трикотажное полотно можно отнести к ортотропным поверхностям, поскольку волокна исследуемого трикотажного полотна обладают переплетением с большим числом изгибов нитей, которые отражают световой поток рассеянно. Диффузионное рассеивание светового потока обусловлено неравномерностью строения волокна, которое имеет структурные элементы различной плотности, часто неравномерно и неплотно расположенные по толщине волокна. Отражение света влажным трикотажом определяется процессами поглощения света водой, отражением и рассеянием света от поверхности волокон, а также рассеянием внутри пор и на неоднородностях, сформированных волокнами.

Основными факторами, влияющими на *КСЯ* влагосодержащих волокнистых материалов, являются влажность, пористость и плотность волокон. Влагосодержащее трикотажное полотно имеет характеристику *КСЯ*, равномерную во всем диапазоне длин волн. Контраст белого влагосодержащего трикотажа по отношению к рыхлому снегу –0,09...0,1.

Водные поверхности характеризуются самыми низкими значениями *КСЯ* и его монотонным уменьшением, поскольку длинноволновое излучение сильнее поглощается водой. Согласно полученным результатам *КСЯ* гидрогеля с влагосодержанием 76% можно отнести к зеркальным поверхностям. Контраст гидрогеля по отношению к чистому льду или воде составляет –0,78...0,44. При снижении влагосодержания гидрогеля до 36% его контраст по отношению к обледеневшему снегу равен –0,3...–0,042, *КСЯ* гидрогеля увеличивается за счет уменьшения поглощения света водой и появления большого числа твердотельных элементов желтого цвета. При смешивании гидрогеля с порошком силикагеля количество элементов желтого цвета еще больше увеличивается, что выражается в увеличении *КСЯ*. Контраст смеси силикагеля и гидрогеля по отношению к обледеневшему снегу составляет –0,081...0,091, но характеристика снега более равномерная, а на *КСЯ* гидрогеля 36% влияет желтый цвет полимера.

Композиционные материалы, изготовленные из порошков растительного происхождения, относятся к смешанным с рассеянно-направленным отражением, у которых элементы поверхности ориентированы большей частью одинаково.

Спектральная яркость растений меняется с их возрастом: она выше у молодых растений и ниже у находящихся в стадии полной зрелости. Основные факторы, влияющие на полученные оптические характеристики хны и лаврового листа, – присутствие хлорофилла и растительных пигментов, структура поверхности и элементов, а также геометрия распределения листьев и отражательная способность связующего. Оптический контраст по отношению к листовенному лесу лаврового листа с крупными частицами составляет 0,12...0,11, лаврового листа с мелкими частицами 4...–0,13...0,03, хны – –0,618...–0,4.

Контраст силикагеля по отношению к речному (белесому) песку составляет 0,605...0,34. Спектральная яркость силикагеля зависит от входящих в его состав минералов и элементов, а также размера гранул и влагосодержания.

При рассеянии света структура поверхности также может влиять на поляризацию электромагнитных волн. Спектральная зависимость степени линейной поляризации отраженного излучения является немаловажным параметром для исследования оптических характеристик объектов.

Полученные данные степени поляризации излучения исследуемых объектов показали, что целлюлозное нетканое полотно обладает слабой анизотропией в направлении проката полотна, за счет чего отраженное излучение имеет выше степень поляризации, чем в случае трикотажного полотна. Разница в значениях степени поляризации излучения для образцов из хны и лаврового листа незначительна, что обусловлено хаотичным распределением без преимущественного направления элементов растительности по поверхности. Сравнивая характеристики поляризации отраженного излучения для образцов на основе гидрогеля и силикагеля, можно сделать вывод, что гидрогель с влагосодержанием 76% по массе имеет степень поляризации отраженного излучения выше по сравнению с остальными образцами, поскольку он обладает гладкой прозрачной поверхностью и большим содержанием воды.

**Заключение.** В результате проведенного исследования разработаны искусственные влагосодержащие материалы и исследованы их оптические характеристики (коэффициент спектральной яркости и степень поляризации) в диапазоне длин волн 440...840 нм.

Показано, что в зависимости от размера и формы частиц, физико-химического состава, структуры поверхности и цвета могут быть получены материалы, оптические контрасты которых по отношению к природным фонам составляют  $-0,1 \dots 0,64$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шашлов, А.Б. Основы светотехники: учеб. для вузов / А.Б. Шашлов, Р.М. Уварова, А.В. Чуркин. – М.: МГУП, 2002. – 280 с.
2. Полевой спектрорадиометр ПСР-02 // Сайт отдела аэрокосмических исследований НИИПФП им. А.Н. Севченко Белгосуниверситета. 2013. – Режим доступа: <http://remsens.by/development/spectrometers/psr02>. – Дата обращения: 19.09.2015.
3. Полевой спектрорадиометр ПСР-02 на область 0,35–2,5 мкм / Б.И. Беляев [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2010. – № 2 – С. 127–132.
4. Pulko, T. Solution composition influence on the optical characteristics of liquid-containing composite materials / T. Pulko, P. Safrankov, N. Nasonova // International Conference «Optical Techniques and Nano-Tools for Material and Life Sciences»: In two volumes Vol. II (Section 7, Poster Section) (Minsk, Belarus, June 15–19, 2010). – Minsk: “Kovcheg”, 2010. – P. 80–85.
5. GIS-Lab: Спектры отражения природных объектов – база данных [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gis-lab.info/projects/spectra>. – Дата доступа: 21.01.2015.

Поступила 24.09.2015

#### RESEARCH OF OPTICAL CHARACTERISTICS OF COMPOSITE MATERIALS INCLUDING WATER SOLUTIONS

**I. GRABAR, N. NASONOVA, T. PULKO, L. LYNKOU**

*The optical characteristics (spectral brightness coefficient and the degree of polarization) artificial materials including water solutions were obtained in the wavelength range of 440...940 nm. The analysis of dependences of the got results is conducted from the particle size, color and surface structure of the samples. The correlation between the optical characteristics of the investigated materials with natural backgrounds (snow, sand, water surface, vegetation) is found out.*

**Keywords:** moisture-containing composite materials, coefficient of spectral brightness, degree of polarization, optical contrast.